第 43 卷　第 1 期
2023 年 2 月

桂 林 电 子 科 技 大 学 学 报
Journal of Guilin University of Electronic Technology

Vol. 43，No. 1
Feb. 2023

基于多输入多输出阵列的 3D-FDA-SAR 成像方法

胡梦伊[1]，廖可非[1,2]，欧阳缮[1,2]，李晶晶[1]

（1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院，广西 桂林　541004；
2. 桂林电子科技大学 卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心，广西 桂林　541004）

摘　要：针对频率分集阵列三维合成孔径雷达（3D-FDA-SAR）成像方法阵元数目多、阵元利用率低的问题，提出一种基于多输入多输出阵列的 3D-FDA-SAR 成像方法。将 3D-FDA-SAR 切航迹向的频率分集阵列改为多输入多输出频率分集阵列，多输入多输出频率分集阵列随运动平台运动，在沿航迹向形成综合孔径，结合切航迹向的实阵列，合成虚拟二维频率分集阵列平面，获得对目标的下视三维成像能力。首先建立多输入多输出 3D-FDA-SAR 成像模型与信号模型，利用多输入多输出技术，在发射端发送波形正交信号单频窄带信号，在接收端通过全频接收方式，接收所有发射阵元经目标反射后的回波信号，经正交匹配滤波器进行信号分离，获得不同收发通道的回波数据，再利用后向投影算法对回波数据进行成像处理，最终获得目标的三维成像结果。仿真结果表明，基于多输入多输出阵列的 3D-FDA-SAR 成像方法使用少量阵元，提高了阵元利用率，获得了对下视目标的三维成像能力。

关键词：多输入多输出；频率分集阵列；合成孔径雷达；三维成像；后向投影

中图分类号：TN957.52　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-808X(2023)01-0007-06

3D-FDA-SAR imaging method based on multiple-input multiple-output array

HU Mengyi[1], LIAO Kefei[1,2], OUYANG Shan[1,2], LI Jingjing[1]

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center of Satellite Navigation Positioning and Location Service, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem of the large number of array elements and low utilization rate of the three-dimensional synthetic aperture radar (3D-FDA-SAR) imaging method of frequency diversity arrays, a 3D-FDA-SAR imaging method based on multiple input and multiple output arrays is proposed. The frequency diversity array of 3D-FDA-SAR tangent track direction is changed to multiple input multiple output frequency diversity array. The multiple input multiple output frequency diversity array moves with the moving platform to form a synthetic aperture along the track direction, combined with the tangent track direction The real array is combined with a virtual two-dimensional frequency diversity array plane to obtain the downward-looking three-dimensional imaging capability of the target. Firstly, a multi-input multi-output 3D-FDA-SAR imaging model and signal model are established, using multi-input multi-output technology, the waveform quadrature signal single-frequency narrowband signal is sent at the transmitting end, and all the transmitting arrays are received through the full-frequency receiving mode at the receiving end. The echo signal reflected by the target is separated by a quadrature matched filter to obtain the echo data of different receiving and sending channels, and then the echo data is imaged by the backward projection algorithm, and finally the three-dimensional imaging result of the target is obtained. Experimental simulation results show that the 3D-FDA-SAR imaging method based on multiple-input multiple-output arrays uses a small number of array elements, improves the utilization of the array elements, and obtains the three-dimensional imaging capability of downward-looking targets.

收稿日期：2021-03-22

基金项目：国家自然科学基金（61631019，61871425）；广西创新驱动发展专项（桂科 AA21077008）；桂林电子科技大学研究生教育创新计划（2020YCXS035）

通信作者：廖可非（1984—），男，副教授，博士，研究方向为雷达三维成像、散射截面积测量、认知雷达。E-mail：kefeiliao@guet.edu.cn

引文格式：胡梦伊，廖可非，欧阳缮，等. 基于多输入多输出阵列的 3D-FDA-SAR 成像方法[J]. 桂林电子科技大学学报，2023，43(1)：7-12.

Key words：multiple input multiple output；frequency diverse array；synthetic aperture radar；three dimensional imaging；back projection

合成孔径雷达(synthetic aperture radar，简称 SAR)包括二维 SAR 和三维 SAR，三维 SAR 克服了二维 SAR 存在的叠掩等问题，成为当前 SAR 研究的热点。三维 SAR 成像技术主要包括干涉 SAR[1]、层析 SAR[2]、圆周 SAR[3]、阵列三维 SAR[4-6]等。与其他三维 SAR 相比，阵列三维 SAR 通过在运动平台切航迹向放置线阵，线阵随平台在空间中运动，形成沿航迹向的综合孔径，结合切航迹向的实孔径，合成二维虚拟阵列平面，再利用距离向的脉冲压缩技术获得对目标的三维高分辨成像能力，具有简单灵活的特点，成为三维 SAR 重要研究方向。

传统阵列三维 SAR 基于相控阵雷达体制，射频前端发送宽带信号，由此带来了宽带信号非线性和接收端宽带信号不能有效分离的问题。2006 年，Antonik 等[7]提出了频率分集阵列(frequency diverse array，简称 FDA)概念，发射阵元不再发送大时宽带宽信号，而是发送具有频率差的单频信号，其带宽为发射阵元不同单频分量拼接获得。同时其波束方向图具有时间、距离、角度耦合的特点[8-10]，因此其对目标进行定位成像时，存在距离和角度的模糊问题。针对这一问题，顾坤良等[11]提出了一种多次改变频率分集阵列频偏的方法，并基于 MUSIC 算法对多目标进行定位。文献[12]采用随机频率增量的方法，获得理想图钉状波束方向图，并使用压缩感知算法进行成像仿真验证。文献[13]进一步对随机频率分集增量系数进行分析，提出了一种多目标无模糊定位方法。频率分集阵列三维成像是二维成像的自然延伸，文献[14-16]利用二维线性频率分集平面，获得对目标的三维成像能力，但其波束方向图是三维耦合的。进一步的，Li 等[17]提出频率分集阵列三维合成孔径雷达成像(three dimensional frequency diverse array synthetic aperture radar，简称 3D-FDA-SAR)方法，实现了对目标无模糊成像，然而该方法还存在发射阵元数目多、阵元利用率低的问题。多输入多输出合成孔径雷达[18-20]，发射端发送正交信号，接收端进行正交信号分离，使用少量阵元，可等效多个相互独立的虚拟阵元，提高了阵元利用率。鉴于此，将多输入多输出技术引入 3D-FDA-SAR 系统中，提出多输入多输出 3D-FDA-SAR 成像方法。

1 多输入多输出阵列构型

在系统几何构型满足远场条件下，一对收发分置的天线阵元，可以由其基线中心位置的一个虚拟收发共用的阵元来等效。多输入多输出阵列采用发射阵元放置在阵列两端，接收阵元放置在阵列中间的阵列构型。图 1 以 4 发 4 收为例，展示了在该阵列构型下，实际收发阵元位置和等效阵列示意图，其中发射阵元间距为 $2d$，接收阵元间距为 $4d$，收发阵元间距与等效阵列间距均为 d。

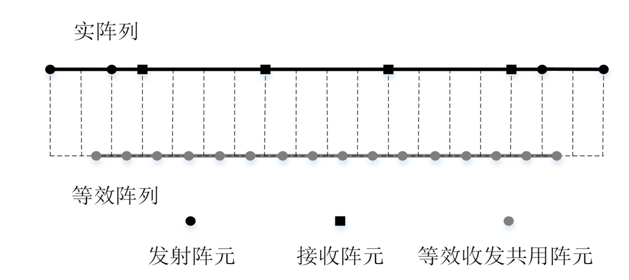


图 1 多输入多输出阵列构型及等效阵列分布示意图

为获得均匀分布的等效阵列，该阵列构型需满足：

$$\begin{cases} d_{\mathrm{T}} = 2d, \\ d_{\mathrm{R}} = Pd, \\ d_{\mathrm{TR}} = d, \end{cases} \tag{1}$$

其中：d_{T} 为发射阵元间距；d_{R} 为接收阵元间距；d_{TR} 为收发阵元间距；P 为发射阵元总数；d 为虚拟阵列的阵元间距。实际阵列长度

$$l_{\mathrm{r}} = (P + PQ - 2)d, \tag{2}$$

其中 Q 为接收阵元总数。等效阵列的长度

$$l_{\mathrm{v}} = (PQ - 1)d, \tag{3}$$

阵元利用率

$$\eta = \frac{l_{\mathrm{v}}}{l_{\mathrm{r}}}。 \tag{4}$$

2 基于多输入多输出阵列 3D-FDA-SAR 成像模型

图 2 为基于上述阵列的 3D-FDA-SAR 成像几何模型和重要参数。其中多输入多输出频率分集阵列装载于运动平台并沿 y 轴(切航迹向)均匀分布。运动平台在一定高度 H，沿 x 轴(沿航迹向)直线飞行。在不同时刻平台运动到沿航迹向的不同观测点，在每个观测点为发射阵元重新选择一组无重复的 P 个随机频率，其中发射阵元的随机频率增量从增量集合 $\{0,1,\cdots,(L-1)\Delta f\}$ 中随机选取，L 表示增量系数的最大值，满足 $(L-1)\Delta f \ll f_0$。

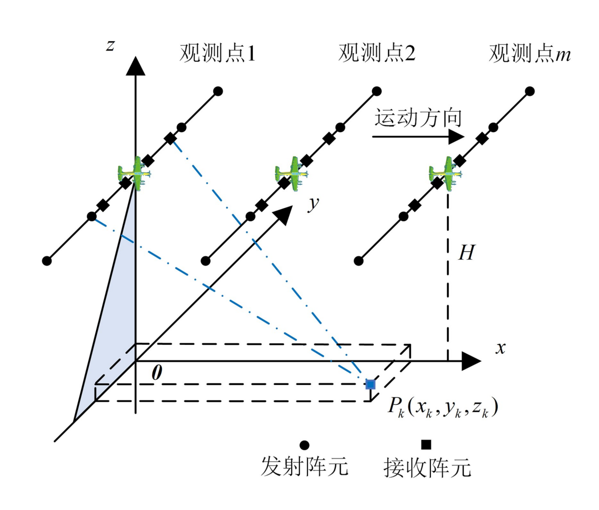


图 2　基于多输入多输出 3D-FDA-SAR 成像模型

多输入多输出频率分集阵列随运动平台在 0 时刻，从高度 H 处以速度 ν 沿 x 轴运动。在沿航迹向形成间隔为 d_x 的 M 个观测点。在第 m 个观测点时，第 p 个发射阵元的频率为

$$f_{m,p}=f_0+\Delta f_{m,p}=f_0+l_{m,p}\Delta f, \tag{5}$$

其中：f_0 为载频；$l_{m,p}$ 为频率增量系数，且满足 $l_{m,p}\in\{0,1,\cdots,L-1\}$；$\Delta f$ 为单位频率增量。在第 m 个观测点，第 p 个发射阵元发送的信号为

$$S_{m,p}(t)=\phi_{m,p}(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0+l_{m,p}\Delta f)t},0\leqslant t\leqslant T_P, \tag{6}$$

其中：T_p 为脉冲持续时间；$\phi_{m,p}$ 为发射归一化包络的正交波形。不同阵元发射的信号彼此正交，满足如下条件：

$$\begin{cases}\int_{T_P}\phi_{m,p_1}(t)\phi^*_{m,p_2}(t-\tau)\mathrm{d}t=0,\ p_1\neq p_2,\\ \int_{T_P}\phi_{m,p_1}(t)\phi^*_{m,p_2}(t-\tau)\mathrm{d}t=1,\ p_1=p_2,\end{cases} \tag{7}$$

其中：τ 为时延；p_1、p_2 为发射阵元；$*$ 表示共轭运算。考虑远场情况，则在第 m 个观测点时，第 q 个阵元接收到的回波信号为

$$y_{m,q}(t)=\sum_{k=1}^{K}\Big(\sigma(k)\sum_{p=0}^{P-1}\phi_{m,p}(t-\tau_{m,p,q}(k))\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_{m,p}(t-\tau_{m,p,q}(k)))}\Big)+e_{m,q}(t)\approx\sum_{k=1}^{K}\Big(\sigma(k)\sum_{p=0}^{P-1}\phi_{m,p}(t-\tau_0)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_{m,p}(t-\tau_{m,p,q}(k)))}\Big)+e_{m,q}(t), \tag{8}$$

其中：$\sigma(k)$ 为第 k 个目标的反射系数；$\tau_0=2r/c$ 为公共时延；$e_{m,q}(t)$ 为加性噪声 $\tau_{m,q,p}(k)$ 为目标到发射和接收阵元的往返时延，包括目标到达发射阵元造成的时延 $\tau^{\mathrm{T}}_{m,p}(k)$ 和目标到达接收阵元产生的时延 $\tau^{\mathrm{R}}_{m,q}(k)$：

$$\tau_{m,q,p}(k)=\tau^{\mathrm{T}}_{m,p}(k)+\tau^{\mathrm{R}}_{m,q}(k)=\frac{r^{\mathrm{T}}_{m,p}(k)}{c}+\frac{r^{\mathrm{R}}_{m,q}(k)}{c}, \tag{9}$$

其中：$r^{\mathrm{T}}_{m,p}(k)$ 为发射阵元与目标点的距离；$r^{\mathrm{R}}_{m,q}(k)$ 为接收阵元与目标点的距离，

$$r^{\mathrm{T}}_{m,p}(k)=\sqrt{(P_x(k)-md_x)^2+(P_y(k)-y_{tp})^2+(P_z(k)-H)^2}, \tag{10}$$

$$r^{\mathrm{R}}_{m,p}(k)=\sqrt{(P_x(k)-md_x)^2+(P_y(k)-y_{tp})^2+(P_z(k)-H)^2}, \tag{11}$$

其中：$P_x(k)$、$P_y(k)$、$P_z(k)$ 为第 k 个目标在直角坐标系下的坐标值；y_{tp}、y_{rq} 为发射与接收阵元的 y 轴坐标值。在第 m 个观测点，经匹配滤波 $\phi_{m,p}(t-\tau_0)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{m,p}t}$，得到此观测点第 q 个接收阵元，接收来自第 p 个发射阵元的回波信号为

$$y_{m,q,p}(t)=\sum_{k=1}^{K}\{\sigma(k)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{m,p}\tau_{m,p,q}(k)}\}+e_{m,q,p}(t)。 \tag{12}$$

3　成像方法与仿真结果

3.1　基于后向投影算法的成像方法

根据式(12)得到第 m 个观测点处的回波数据：

$$\boldsymbol{y}_m=\begin{bmatrix}y_{m,1,1} & y_{m,1,2} & \cdots & y_{m,1,Q}\\ y_{m,2,1} & y_{m,2,2} & \cdots & y_{m,2,Q}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ y_{m,P,1} & y_{m,P,2} & \cdots & y_{m,P,Q}\end{bmatrix} \tag{13}$$

对成像区域划分网格体，第 g 个网格体与第 m 个观测点的第 p 个发射阵元、第 q 个接收阵元的距离分别为 $r^{\mathrm{T}}_{m,p}(g)$、$r^{\mathrm{R}}_{m,q}(g)$，收发时延为 $\tau_{m,p,q}(g)$，其中，

$$\tau_{m,p,q}(g)=\frac{r^{\mathrm{T}}_{m,p}(g)+r^{\mathrm{R}}_{m,q}(g)}{c}。$$

对回波数据进行相位补偿，得到第 g 个网格体与第 m 个观测点，p 个发射阵元 q 个接收阵元的成像处理值：

$$I_{m,p,q}(g)=y_{m,p,q}(g)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(f_0+l_{m,p})\Delta f\tau_{m,p,q}}, \tag{14}$$

遍历所有收发阵元，得到第 g 个网格体与第 m 个观测点所有收发阵元的相位补偿矩阵为

$$\boldsymbol{\Phi}_m(g)=\begin{bmatrix} e^{j2\pi l_{m,1}\Delta f\tau_{m,1,1}} & e^{j2\pi l_{m,1}\Delta f\tau_{m,1,2}} & \cdots & e^{j2\pi l_{m,1}\Delta f\tau_{m,1,Q}} \\ e^{j2\pi l_{m,2}\Delta f\tau_{m,2,1}} & e^{j2\pi l_{m,2}\Delta f\tau_{m,2,2}} & \cdots & e^{j2\pi l_{m,2}\Delta f\tau_{m,2,Q}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{j2\pi l_{m,P}\Delta f\tau_{m,P,1}} & e^{j2\pi l_{m,P}\Delta f\tau_{m,P,2}} & \cdots & e^{j2\pi l_{m,P}\Delta f\tau_{m,P,Q}} \end{bmatrix}, \tag{15}$$

联立式(13)与式(15)，得到第 m 个观测点处相位补偿后的成像处理值：

$$\boldsymbol{I}_m(g)=\boldsymbol{y}_m(g)\circ\boldsymbol{\Phi}_m(g), \tag{16}$$

其中，$\circ$ 表示哈达玛积，每个网格体需要进行 M 次观测。对每个观测点相位补偿后的成像处理值进行相参累加，得到最终成像像素值：

$$I(g)=\left|\sum_{m=0}^{M-1}\boldsymbol{I}_m(g)\right|。 \tag{17}$$

3.2 仿真结果

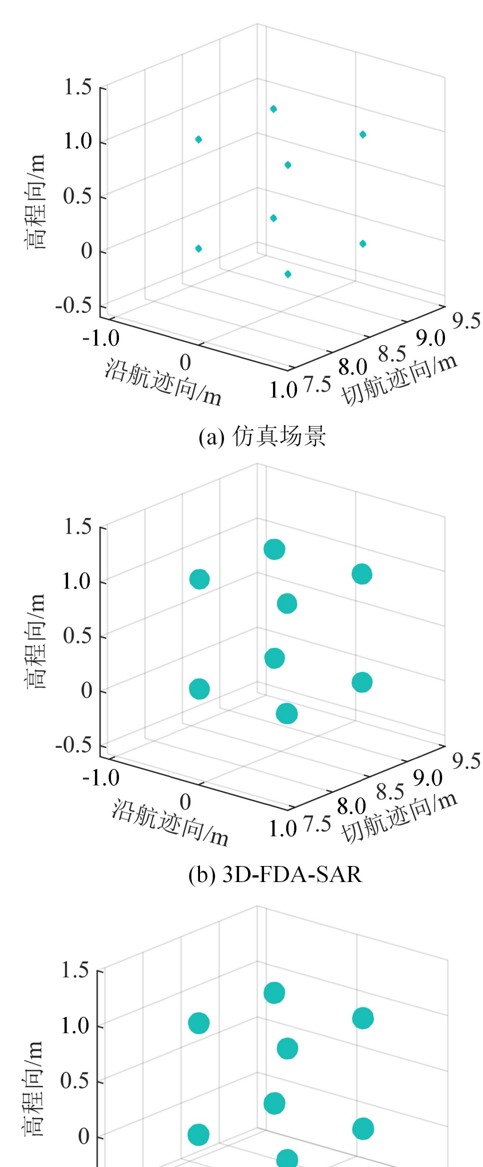
根据上述后向投影算法思想及处理流程，对多输入多输出 3D-FDA-SAR 模型进行仿真，仿真结果如图 2 所示。根据 ARTINO[7] 实现系统进行参数设置，参数设置如表 1 所示。

表 1　仿真参数

参数	值
载频/GHz	37.5
飞行高度/m	200
飞行速度/(m·s^{-1})	10
X 轴方向虚拟阵列长度/m	4
Y 轴方向虚拟阵列长度/m	4
发射阵元数	40
接收阵元数	36
最大频偏系数	750
单位频率增量/MHz	1

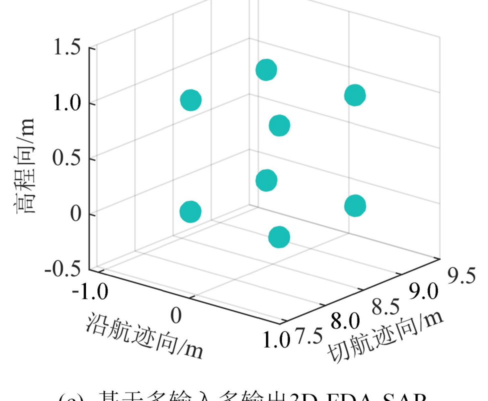
场景设置为 X 轴方向 7.5～9.5 m，Y 轴方向－1～1 m，Z 轴方向－0.5～1.5 m 的区域。图 2(a)为仿真的目标场景，8 个点目标分别位于 1 m 立方体顶点位置，假设目标散射系数为 1，3D-FDA-SAR 与基于多输入多输出阵列构型的 3D-FDA-SAR 仿真结果如图 3(b)与(c)所示，其中成像结果是在成像表面最大值的－3 dB 处进行绘制。

图 3 仿真结果表明，保持其他参数一致，且满足 3D-FDA-SAR 实阵列长度与多输入多输出 3D-FDA-SAR 虚拟阵列长度一致条件。多输入多输出 3D-FDA-SAR 成像方法仅使用 76 个阵元，阵元利用率为 98.6%，可以实现目标的三维成像。



(a) 仿真场景

(b) 3D-FDA-SAR



(c) 基于多输入多输出3D-FDA-SAR

图 3　仿真场景与仿真结果

为进一步分析三维成像效果，保持参数一致，图 4 为 3D-FDA-SAR 在目标点(8，－0.5，0)处的沿航迹向-切航迹向、切航迹向-高程向、沿航迹向-高程向的二维切面图。

从图 4 可看出，3D-FDA-SAR 成像二维切面能量主要聚焦在目标点附近，同时在目标点附近旁瓣较为杂乱。多输入多输出 3D-FDA-SAR 在目标点(8，－0.5，0)处成像二维切面图如图 5 所示。

从图 5 可看出，多输入多输出 3D-FDA-SAR 成像方法，二维切面图清晰且较为规整，使用少量阵元，



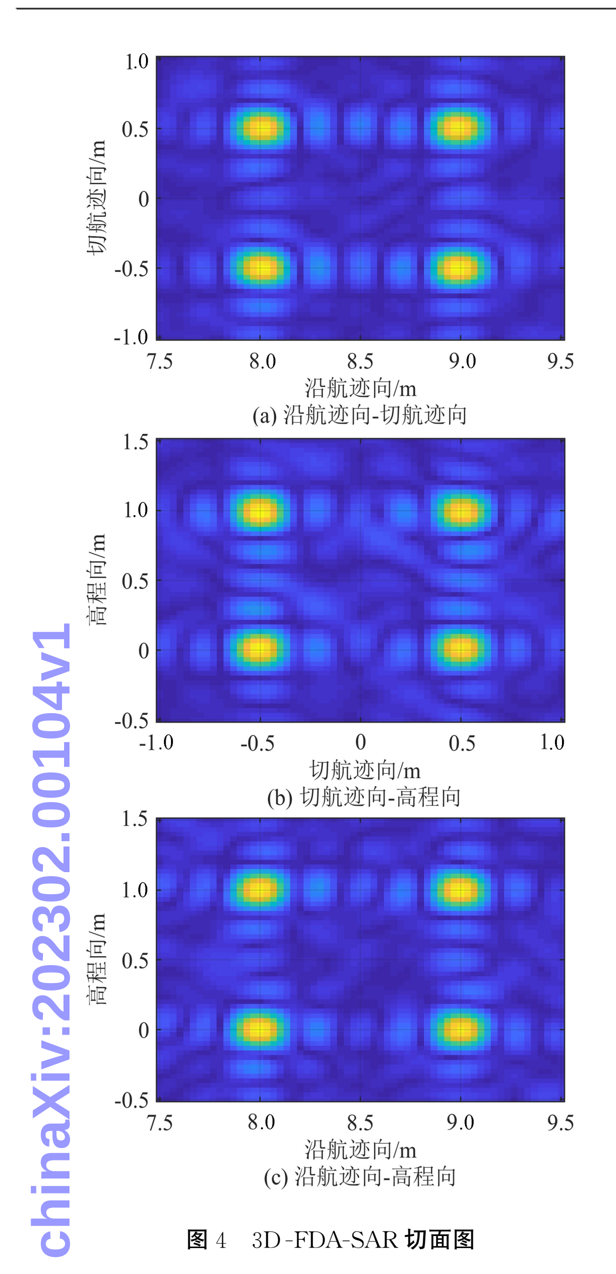


图 4　3D-FDA-SAR 切面图

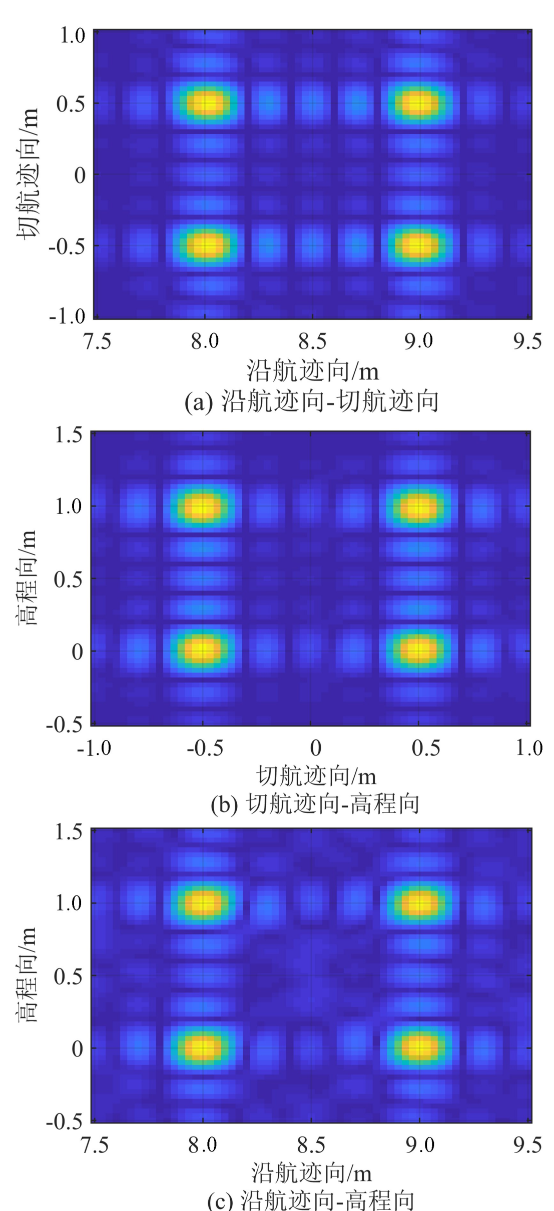


图 5　基于多输入多输出 3D-FDA-SAR 切面图

利用多输入多输出技术进行正交信号分离，提高了阵元利用率，可以实现对目标的三维成像，与理论分析一致。

4　结束语

提出一种基于多输入多输出阵列的 3D-FDA-SAR 成像方法。该方法将多输入多技术引入 3D-FDA-SAR 中，建立了成像模型与信号模型，提高了阵元利用率，实现了对目标的三维成像。仿真结果表明，该方法在相同阵列长度下，提高了阵元利用率，降低了平台载荷，有利于实际布阵与实际应用。

参考文献：

[1] FORNARO G, LOMBARDINI F, SERAFINO F. Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 702-714.

[2] REIGBER A, MOREIRA A, PAPATHANASSIOU K P. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2142-2152.

[3] BRYANT M L, GOSTIN L L, SOUMEKH M. 3D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 211-227.

[4] 丁鹭飞，耿富录，陈建春. 雷达原理[M]. 北京：电子工业出版社，2014：414-429.

[5] 保铮，邢孟道，王彤. 雷达成像技术[M]. 北京：电子工

业出版社,2005:350-386.

[6] 张晓玲,师君,韦顺军. 三维合成孔径雷达[M]. 北京:国防工业出版社,2017:64-79.

[7] ANTONIK P,WICKS M C,GRIFFITHS H D,et al. Frequency diverse array radars[C]//IEEE Conference on Radar. Verona,NY:IEEE Press,2006:215-217.

[8] BASIT A,KHAN W,KHAN S,et al. Development of frequency diverse array radar technology:a review[J]. IET Radar Sonar and Navigation,2018,12(2):165-175.

[9] WANG Wenqin. Ultrawideband frequency-diverse array antennas:range-dependent and autoscanning beampattern analysis[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine,2018,60(3):48-56.

[10] WANG Wenqin,SO Hingcheung,FARINA A. An overview on time/frequency modulated array processing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2017,11(2):228-246.

[11] 顾坤良,欧阳缮,李晶晶,等. 基于 MUSIC 算法的频率分集阵列雷达目标定位方法[J]. 桂林电子科技大学学报,2017,37(2):87-91.

[12] LIU Yimin,RUAN Hang,WANG Lei,et al. The random frequency diverse array:a new antenna structure for uncoupled direction-range indication in active sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2017,11(2):295-308.

[13] LI Jingjing,OUYANG Shan,SUN Xiyan,et al. Ambiguity analysis for multitarget estimation using random permutated frequency diverse arrays[J]. IEEE Access,2020,8:84680-84688.

[14] JONES A M,RIGLING B D. Planar frequency diverse array receiver architecture[C]//2012 IEEE Radar Conference. Atlanta,GA:IEEE Press. 2012:0145-0150.

[15] XU Yanhong,SHI Xiaowei,XU Jingwei,et al. Beampattern analysis of planar frequency diverse array[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering,2015,25(5):436-444.

[16] SAEED S,QURESHI I M,KHAN W,et al. Frequency offset selection based adaptive 3D beamforming in planar frequency diverse array[C]//International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering. Islamabad,Pakistan:IEEE Press,2019:1-6.

[17] LI Jingjing,LIAO Kefei,OUYANG Shan. 3D imaging using synthetic aperture radar with a frequency diverse array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2021,18(5):846-850.

[18] KLARE J,WEISS M,PETERS O,et al. ARTINO:a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver,CO:IEEE Press,2006:3842-3845.

[19] 王力宝. 多输入多输出合成孔径雷达关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010:49-66.

[20] WANG Wenqin. MIMO SAR imaging:potential and challenges[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,2013,28(8):18-23.

编辑:张所滨